

可变速抽水蓄能发电技术应用与进展

韩民晓, Othman Hassan ABDALLA

华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206

摘要 可变速抽水蓄能可成为电网负荷频率控制、平衡可再生能源发电出力波动的有效手段。论文在介绍可变速抽水蓄能整体结构的基础上,重点介绍了交交方式和交直交方式变频励磁单元的拓扑和构成。说明了交交方式具有器件少、可靠性高、易于大容量化等优点,但存在频率只能整数倍减小、无法实现大范围连续调节、响应速度较慢等缺点。而交直交方式具有频率可大范围连续调节、响应速度较快等特点,其性价比呈快速上升趋势。分析了机组在发电方式和电动方式时运行的变速原理和调节过程。通过发电出力与转速的关系曲线说明通过转速控制实现最佳出力的过程。通过泵类负荷输入功率与转速的关系,描述了电动方式下调节转速对电网功率调节的作用。综合考虑能量平衡、波动负荷与可再生能源发电出力跟踪控制及电压稳定控制的需求,形成参考功率。在此基础上,采用d-q解耦方法实现可变速机组有功与无功功率的控制。最后,通过电网功率调节、电压波动控制及风电功率波动抑制示例,阐述了可变速机组对电网运行的控制作用。

关键词 储能;抽水蓄能;可变速;换流器;频率控制;电压控制

中图分类号 TM85

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.16.015

Progress in the Power Generation Technology with Variable Speed Pump Storage and Its Applications

HAN Minxiao, ABDALLA Othman Hassan

State Key Laboratory of New Energy Electric Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

Abstract Variable speed pump storage is very likely become the effective measure for the control of power grid load frequency and for balancing fluctuation caused by renewable energy resources. Based on the principle introduction of variable frequency pump storage, the topology and configuration of frequency conversion and field excitation unit of typical converters used for variable speed pump storage are mainly described. Analysis indicates that the AC-AC cycle-converter has few devices and high reliability, however with limited range of frequency change and low response speed. Meanwhile the AC-DC-AC converter possesses the large range of frequency adjustment and high response speed, its cost performance rapidly raising, and would become the leading topology in the future development. The speed change principle and adjustment process are analyzed for the generator set operating in both generator mode and pump mode. Based on the characteristic curve of electric output power and rotating speed in generator mode, the optimum output power is able to be achieved by speed control. According to the relationship between the input power and speed in pump mode, the power extracting from electric grid is able to be controlled through speed control. The reference power could be calculated by combining the energy balance with fluctuating load, tracing power output generated by renewable energy resources, and the voltage stability control. By adopting a d-q decoupling strategy, the control of active power and reactive power for variable speed unit is able to be realized. Finally, by taking electric fence power adjustment, voltage fluctuation control, and wind generation power balance as example, the control function of variable speed unit to electric fence operation is addressed.

Keywords energy storage; pump storage; variable speed; converter; frequency control; voltage control

0 可变速抽水蓄能技术产生的背景

随着大量间歇性、随机性可再生能源发电的并网运行,基于储能技术的电力平衡控制已成为电网运行与控制的迫

切需求,也被看作电网可持续发展的重要因素^[1,2]。电池、氢气、超级电容、飞轮、超导(SMES)、压缩空气(CAES)、抽水蓄能等多种类型的储能技术已开始电力系统中获得应用^[3]。

收稿日期:2013-03-13;修回日期:2013-03-27

基金项目:新能源电力系统国家重点实验室自主研究课题资助项目

作者简介:韩民晓,教授,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统建模与控制技术,电子邮箱:hanminxiao@ncepu.edu.cn

这些储能方式在能量密度、功率密度、寿命等方面各具特色,研发工作通过不断地提升其控制性能、降低系统造价,使这些储能技术在电力系统的稳定控制、负荷平衡、电能质量等方面发挥着越来越大的作用^[4-5]。从世界范围来看,各种类型的储能技术已有一些运行实验或工程示范,但到目前为止,抽水蓄能被看作是大电网运行控制中唯一具有商业价值的储能方式^[6-10]。

尽管抽水蓄能技术的应用已有 100 多年的历史,但在其性能改进方面,如容量、控制策略、应用领域等方面的技术进步从来就没有停止过。近几十年来抽水蓄能技术最重要的进步是其可变速化的实现^[11-13]。随着可逆式 Francis 水轮机制造技术和电力电子技术的进步,从 20 世纪 90 年代开始,日本应用可变速抽水蓄能技术实现电网频率控制^[14]。近年来,随着大量风力发电的接入,欧洲也开始引入可变速抽水蓄能进行电网功率平衡控制^[15,16]。

电力负荷总是处于随机地、动态地变化过程中。可再生能源发电的大量接入使电网进一步面临双随机过程的挑战。电力公司为了保证任意瞬间发电量与负荷用电的平衡,必须不断调节、控制电力平衡,使系统频率稳定在一定的范围内,这就是负荷频率控制 (Load Frequency Control, 简称 LFC)^[17]。目前,深夜及节假日轻负荷时的 LFC 主要靠发电机组出力进行调整,但随着更多核电厂及大型高效火电厂的投运、高渗透率可再生能源发电的运行,以往的自动频率控制就会显得力不从心了。

抽水蓄能电站在运行过程中,上下水坝水位同时变化,因此,在整个发电过程中,水头变化较大,而对于不同水头,发电最佳效率对应的转速是不同的,因此需要抽水蓄能机组的变速发电运行。抽水蓄能电站在深夜及节假日轻负荷时抽水是作为负荷运行的,抽水蓄能电站又是属于电网公司直接可控的大型负荷,因此人们自然就想到利用抽水蓄能电站进行频率控制。但以往的抽水蓄能电站多为恒速运行机组,通过改变导叶开度等方式都无法实现快速有效的输入功率调节。水泵-水轮机组的输入功率与回转速度的 3 次幂成正比^[18]。也就是说转速有一些变化时,输入功率会有大幅度变化,即通过速度调节可以实现功率大幅度的调整。另外,机组的启动、运行模式的切换等都对变速运行提出要求。国际上从 20 世纪 90 年代初开始运行的可调速抽水蓄能发电系统,一直运行良好,在电力系统 LFC 中发挥重要作用。

可变速抽水蓄能技术及其应用一方面涉及电力电子换流技术,另一方面与控制策略密切相关。本文在系统论述可变速抽水蓄能实现方法的基础上,结合发电与抽水方式下的功率控制展开讨论。结合电网频率控制、可再生能源发电功率平衡控制等应用,通过仿真计算和实测波形示例,说明可变速抽水蓄能技术的控制作用。

1 可变速抽水蓄能变频励磁的实现

总体上说,可变速机组通常分为两类^[9]:转子绕组励磁调

节方式——在发电电动机的转子绕组侧(二次绕组)加装变换装置;定子绕组频率调节方式——发电电动机定子绕组侧(一次回路)设置变换装置。

定子绕组频率调节方式虽有采用的实例,但这种方式要求变换器的容量与发电电动机的容量一致,使系统造价增大,故一般多采用转子励磁调节方式。

转子励磁调节方式又有很多种。为了获取较大调节范围,常常采用所谓的超同期 Scherbius 方式。这种方式的变换装置所需的容量通常为发电电动机容量的 20%~30%,回转速度调节范围约 10%,机组的输入功率调节可达 30%^[20]。

可变速抽水蓄能系统的原理性结构如图 1 所示。

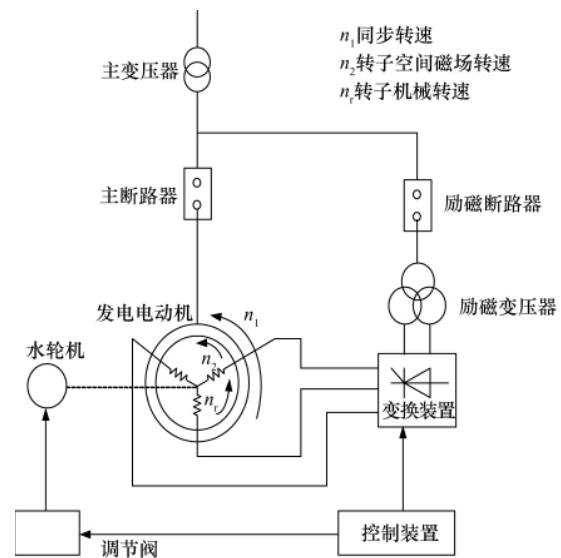


图 1 可变速抽水蓄能系统的原理性结构

Fig. 1 Principle of variable speed pumped storage system

由旋转磁场的原理可知,装有三相绕组的转子线圈,通过三相交流电流时,转子周边会产生旋转磁场。设这一旋转磁场的旋转速度为 n_2 ,转子的机械速度为 n_r ,则从定子侧看,转子旋转磁场的速度 n_1 为

$$n_1 = n_2 + n_r \quad (1)$$

因此,当 n_1 为同步速度且保持定值,调整 n_2 就可以实现 n_r 的调节。

由水泵-水轮机组的特性可知 n_r 的变化,输入功率会形成 3 次幂关系的变化,由此达到大幅调节功率的目的。

可变速抽水蓄能机组的励磁调速系统通常由电力电子器件构成的变换电路实现,该变换电路除容量大的特点之外,还具有快速电流控制、励磁系统过电压抑制、机组的平稳启动、较小的高次谐波、与高压直流输电相当的高可靠性等一系列特点。

实用的变换器类型通常有基于晶闸管的周波变换器方式与基于全控器件(GTO)的电压型或电流型变换器方式。具体选择哪类变换器还应考虑其他条件才能决定。如:电网的

无功状况、电网的稳定性状况、电网对高次谐波的限制、机组造价、发电电动机在制造工艺上的限制、安装空间上的限制等。这两种变换器的构成原理、设计思路与产业界广泛应用的变频器十分相似,但在大容量化、高可靠性及电力系统故障时过电压的防止等方面有一些专门的考虑。

1.1 交交(周波)变换器

周波变换器方式采用晶闸管器件将工频电流转变为数赫兹的交流电流。用于可变速机组励磁的周波变换器示例电路如图2所示。图中,有3组并列的周波变换器分别为转子绕组提供三相励磁电流。每相通过双副边绕组变压器($\Delta/\Delta/Y$)将变换器分为上桥臂和下桥臂,这样每相有24个晶闸管阀臂,整个装置有72个阀臂。这种方式大大降低了流入系统的谐波,减小了功率器件的压力。

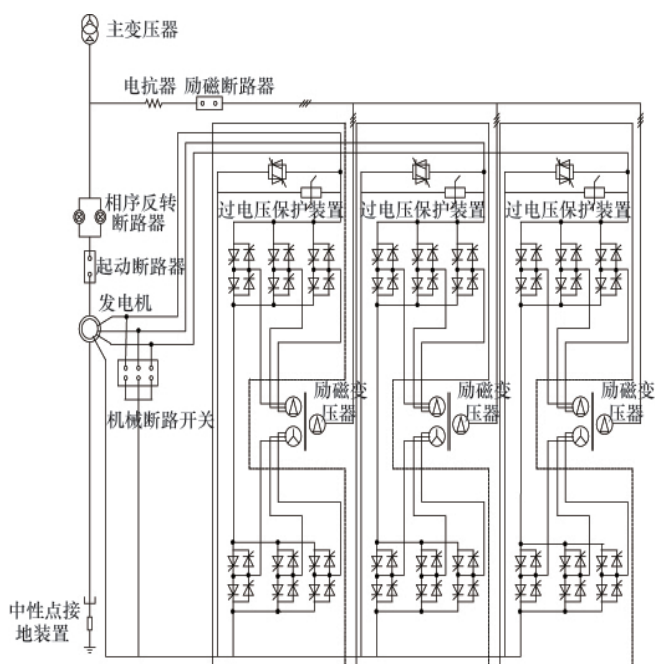


图2 周波变换器方式励磁回路

Fig. 2 Excitation circuit of cycloconverter

日本关西电力公司大河内可变速机组就采用了这种励磁方式。机组容量为 $395\text{MV}\cdot\text{A}$,励磁容量为 $72\text{MV}\cdot\text{A}$,工作电压 5200V ,电流 8000A ,频率变化范围 $\pm 5\text{Hz}$,所采用的晶闸管的规格为 $4000\text{V}-3000\text{A}$ 。装置于1995年投入运行,在地区电网功率调节中发挥重要作用。实测表明,该装置运行过程中,系统母线谐波畸变率小于 1% ,因而无须设置滤波器^[17]。

由于这类周波变换器脉冲数多,控制精度要求高,因而,控制系统多采用高速数字处理器(DSP)实现。

这类周波变换器在运行过程中,会面临一系列必须妥善解决的问题,如系统故障引起母线电压下降;可能导致换流的失败;系统发生不对称故障时负序电压、对地电流等造成的过电压等。解决上述问题通常可通过上、下桥臂作用的快速切换或加入过电压保护装置来抑制过电压。

周波变换器方式具有易于大容量化,器件少,可靠性高等优点。但这类换流器存在与普通周波变换器同样的局限性,频率只能整数倍减小,无法实现频率大范围连续调节,另外,受晶闸管关断时间的限制,响应速度较后面论述的交直交(AC/DC/AC)方式要低。周波变换器方式目前在可变速机组中还在广泛应用。随着晶闸管单体耐压水平和通流能力的提高,有望减少这类变换器每个阀臂的器件的串并联数目。这样更利于实现大容量和提高装置的可靠性。

1.2 交直交(AC/DC/AC)变换器

基于全控器件(GTO)实现的交直交变换器如图3所示。图中,右侧为采用GTO实现的从系统交流电源到直流的整流回路(AC/DC变换)。直流母线通过GTO过电压斩波电路、平波电容连接到低频交流逆变回路。变换电路中还包括控制、保护必须的测量回路及断路器、限流器等元件。

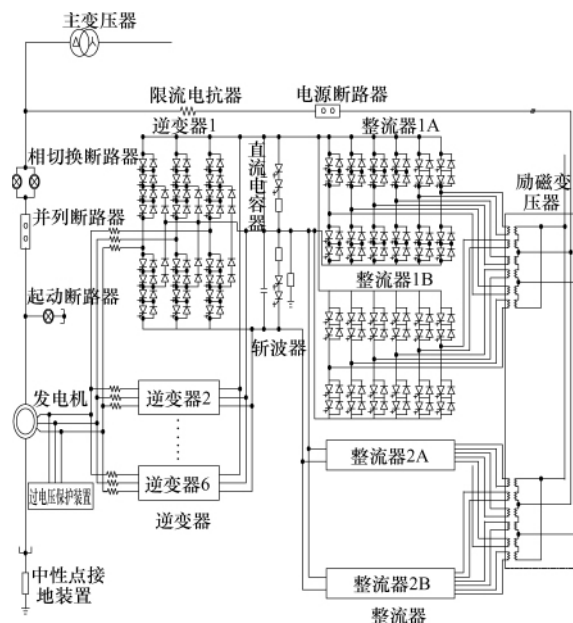


图3 AC/DC/AC方式励磁回路

Fig. 3 AC/DC/AC excitation circuit

逆变器为三相三电平方式。为了提高输出容量,采用6个相同的单元并联而成。三电平采用二极管钳位方式,3个桥臂由4个GTO与若干反并联二极管组成,结构简单,可靠性高。

从图3可以看出,整流器由接于上方直流母线的1A、1B和接于下方直流母线的2A、2B共4个单元构成,每个单元由3个单相桥并联构成。每个桥臂由2个GTO串联构成,因而,这种整流器实际上属于全控型整流器,可以实现功率的反送。这类换流器方式还可为系统提供动态无功,支持电网的电压稳定控制。

这种方式的励磁电路已在日本奥清津第二发电厂成功运行^[2]。随着容量大、损耗小、频率高的电力电子器件的进一步发展,这类励磁方式有望在性价比方面获得更大的提高。

近年来,随着变频驱动技术的发展,基于全控器件的其他类型多电平方式的励磁换流电路也得到关注^[2]。

2 可变速抽水蓄能机组发电方式的工作过程

可变速抽水蓄能机组工作于发电方式时与双馈异步风力发电机原理^[23]完全一致,工作方式包括以下几种。

(1) 亚同步运行状态: $n < n_1$,滑差频率为 f_2 的电流产生的旋转磁场转速 n_2 与转子的转速方向相同。

(2) 超同步运行状态: $n > n_1$,滑差频率为 f_2 的电流产生的旋转磁场转速 n_2 与转子的转速方向相反。

(3) 同步运行状态: $n = n_1$,滑差频率为 $f_2 = 0$,转子为直流励磁,与普通同步发电机相同。

机组处于发电状态时,对于给定水流截面,不同水头百分数下机组输出功率与转速的关系可从文献[24]导出,如图4所示。可以看出,对于不同水头,机组发电出力对应的最佳转速是变化的。通过控制励磁的频率可以调节转子的速度,从而实现不同水头时的最佳功率输出。通常,可变速机组通过发电时水轮机按最佳速度运行,可使效率提高3%~5%。另一方面,发电方式下,通过机组调速,也可较大范围改变输出功率,从而实现电网功率平衡控制^[9],如图5所示。

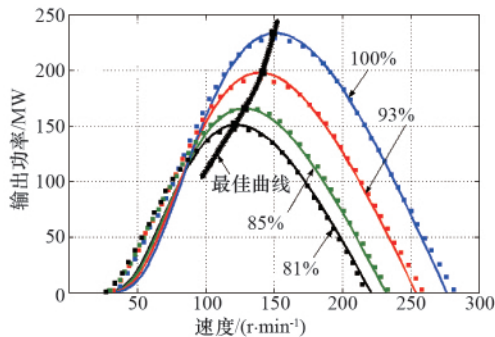


图4 机组输出功率与转速的关系

Fig. 4 Relationship between output power and speed of the unit

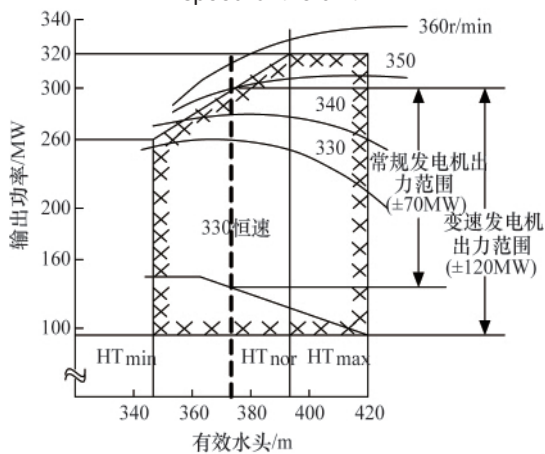


图5 可变速机组发电工况时的出力变化

Fig. 5 Output power variation of variable speed unit under electrical conditions

3 可变速抽水蓄能机组电动方式的工作过程

众所周知,绕线转子异步电动机转子通过串入可调电阻可以实现调速,然而,这种方法存在效率低、转矩特性变差、调节不便等问题。转子串接电动势调速法是基于类似原理,特性更为优良的调速方法。可变速抽水蓄能机组工作于电动方式时,正是依据这种串级调速原理^[25],参见图6。

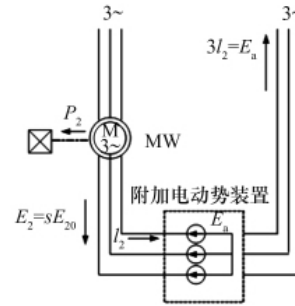


图6 绕线转子异步电动串级调速原理图

Fig. 6 Principle of wound rotor induction motor cascade speed control

这种调速方法的特点是,在绕线转子异步电动机的转子绕组电路中串入附加电动势,并使3个附加电动势的极性与转子绕组的感应电动势极性相反或相同,由此得到的转子电流:

$$I_2 = \frac{sE_{20} + E_a}{\sqrt{r_2^2 + (sx_{20})^2}} \quad (2)$$

式中, s 为滑差, E_{20} 为转子静止时的感应电势, E_a 为转子回路的附加电动势, r_2 和 x_{20} 分别为转子回路的电阻、电抗。在反极性的附加电动势作用下,转子电动势必然减小,以致带不动负载而使电动机转速减慢。当电动机转速降低到一定值时,转子绕组的感应电动势加大,并补偿了附加电动势的削弱作用,从而使电动机的转子电流保持在带动负载所必需的值。此时,电动机已被调节到低速运行了。很明显,转子电路中串入的外部附加电动势越大,电动机的转速将越低。改变附加电动势的大小,同样可以调节绕线转子异步电动机的转速。在电动机转子电路中串入附加电动势的调速方法,能量消耗小。当电动机转速较低时,由电动机定子电流输入的电能只有一小部分变为转子轴上的机械能,用来带动负载,而大部分能量被送到转子电路。这部分能量可以通过电动机转子电路端连接的逆变器,回馈到交流电网中。这种在绕线转子异步电动机转子回路中串入附加电动势 E_a 的高效率调速方法,一般称作串级调速。

串级调速还可以向高于电动机同步速方向调速,只要使 E_a 的相位与 E_2 的相同即可。此时转子电流 I_2 值增大,电动机转矩亦相应增大,电动机转矩值大于负载阻力转矩值时,迫使电动机加速,转差率减小, I_2 亦随之减小。当 E_a 值足够大时,电动机必然要加速超过同步速,使 $s < 0, E_2 = sE_{20} < 0, E_2$ 反相,能使 I_2 减小,恢复到使电动机转矩重新与负载转矩相等

时,加速过程结束,电动机处在高于同步速的某值下稳定运转。此时虽然 $n > n_1$,电动机仍在电动状态下运行。这就是异步电动机向高于同步速方向调速的超同步串级调速原理。 E_a 的幅值越大,电动机稳定转速就越高。

如前所述,由于泵类负载的输入功率与转速的立方成正比。因此,通过转子速度的调整,可大幅度调整输入功率,进而达到电网负荷频率控制的目的。图 7 所示为抽水运行时输入功率的变化范围^[19]。图中所绘的粗实线为传统定速机组的输入功率与扬程的对应关系曲线。可见,扬程一定时,输入功率几乎不可调整了。而可变速机组,随着转速的变化,输入功率在图中所示的梯形框中大范围变化,从而起到利用负荷变化调节系统频率的目的。

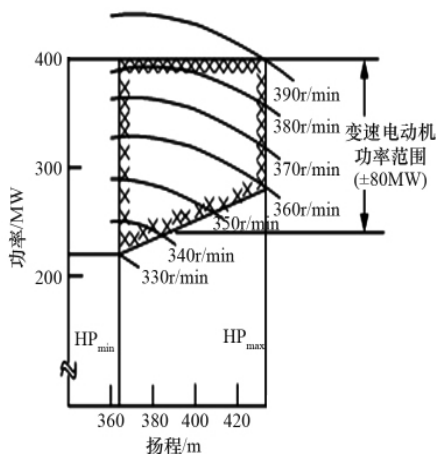


图 7 可变速机组抽水工况的变速运转特性曲线
Fig. 7 Characteristic curve of the variable speed operation of variable speed unit pumping conditions

4 可变速抽水蓄能机组的控制过程

为充分发挥可变速机组在电网运行中的控制作用,通常将多种控制功能相互结合,如图 8 所示^[20]。调度系统在整个电网层面考虑能量平衡和最优控制的基础上得到最优功率 $P_{optimal}$,控制系统根据负荷波动(包括可再生能源发电出力波动)跟踪控制及系统频率控制形成附加控制量 $\Delta p_w, \Delta p_f$ 。这些量相叠加形成有功功率的参考量 P_{ref} 。其中, Δp_w 通常采用波动性负荷或可再生能源发电出力的测量值与预测值之差形成:

$$\Delta p_w = p_{mea} - p_{pre} \quad (3)$$

而 Δp_f 则可以是简单的下垂控制,也可以通过增添附加项用于电网振荡阻尼^[27]。

$$\Delta p_f = \left[K_{droop} + \frac{sT_d}{(1+sT_d)(1+sT_{fil})} \right] (f_{ref} - f_{grid}) \quad (4)$$

式中, K_{droop} 为下降调节系数, T_d, T_{fil} 分别为调节系统与滤波系统的时间常数。 f_{ref}, f_{grid} 分别为参考频率和电网的实际频率。机组的无功功率则依据电压稳定控制需要计算形成。在有功、

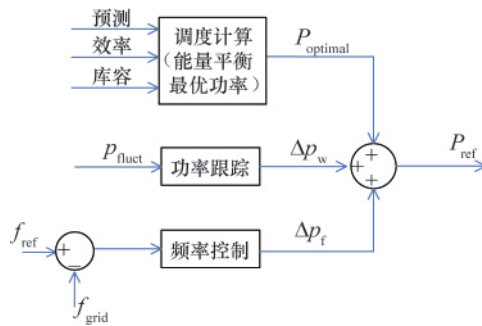


图 8 可变速机组参考功率的形成
Fig. 8 Formation of reference power for variable speed unit

无功参考值确定的情况下,控制系统通过锁相获得电网相位和频率,采用 d-q 解耦实现功率控制^[28]。

5 可变速抽水蓄能机组在电网控制中的应用示例

5.1 功率调节

可变速机组在水轮机轴功率保持不变的情况下,通过调节转子励磁绕组的电流,就可以实现有功出力与无功出力的单独调节,因而对电网发生的诸如电压失稳、低频振荡等不稳定现象有一定的抑制作用,提高系统的稳定控制能力。图 9 所示为有功控制的示例。现场实验表明,可变速机组的电力系统功率的控制能力可达到与高压直流输电附加控制接近的水平^[19]。

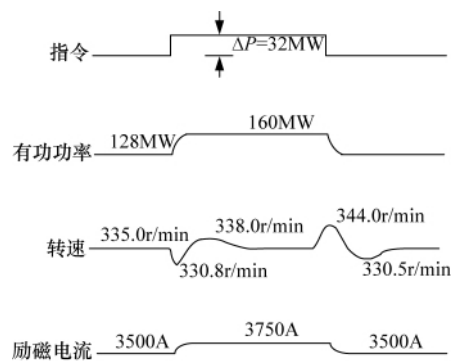


图 9 可变速机组功率的调节
Fig. 9 Power regulation of variable speed unit

5.2 电压控制

利用可变速机组的无功调节能力,可以实现电网电压的稳定控制。表 1 为可变速抽水蓄能机组与一含风电场的小系统的电压波动控制作用的对照^[29]。其中,方式 1 为无功零输出,即抽水蓄能机组不参与电压调节;方式 2 为电压闭环控制;方式 3 为无功闭环调节;方式 4 为无功下垂控制,可以明显看出可变速机组的电压控制作用。

5.3 风电出力平衡

表 2 所示为可变速抽水蓄能机组对一含风力发电场的

表 1 机组无功输出方式与电压波动对照

Table 1 Comparison between unit reactive power output mode and voltage fluctuation

输出方式	电压波动/%
方式 1	3.8
方式 2	0.6
方式 3	1.0
方式 4	2.5

表 2 可变速机组频率控制效果对照

Table 2 Comparison between frequency control effects for variable speed unit

控制方式	频率偏差/Hz
方式 1	0.93
方式 2	0.42
方式 3	0.25

小系统的频率控制作用^[29]。表中方式 1 为可变速抽水蓄能机组恒功率输出,方式 2 为负荷跟踪方式输出,方式 3 为下垂控制+负荷跟踪方式输出。可以看出,通过在基础功率之上叠加负荷跟踪功率和频率控制功率,可以获得最好的频率控制效果。

6 结论与展望

未来电网一方面有更多大容量火电、核电等刚性电源投入运行,另一方面,风电、太阳能等波动性、随机性强的电源在电网中的比例进一步提高。可变速抽水蓄能是解决这一趋势中功率平衡、电能质量等诸多问题的有效途径。本文在介绍可变速抽水蓄能机组原理、结构及特点的基础上,针对发电、抽水两种模式的工作过程及控制特性进行了分析。结合电网功率调节、电压控制及风电功率波动抑制等示例,论述了可变速抽水蓄能机组的控制作用。

因篇幅所限,本文未对变换电路的其他方式展开讨论,有关可变速抽水蓄能发电运行和抽水运行也只给出了定性分析,有关定量分析可参考文献[23]、[25]。

本文相关论述主要针对转子励磁方式,且多用于大系统的功率调节。可变速抽水蓄能还可用于小型系统或孤岛运行时的频率支撑和电网稳定控制^[27-29],或用于小容量水力可变速发电^[30],这时换流器也常常采用定子电流频率调节方式。

可变速抽水蓄能技术快速功率调节的实现,从本质上讲是电力电子换流技术及控制技术的应用。因此,未来该领域的技术发展重点将是换流器中新器件、新拓扑的应用及与可再生能源发电出力协调控制的实现。

从文中的描述可以看出,可变速抽水蓄能技术涉及水力、水工、机械、电气等多个学科,关联设计、生产、施工、运行等多个部门。因此,可变速抽水蓄能技术的推广应用必须汇

集多学科的资讯,通过多部门的联合运作,使可变速抽水蓄能技术在中国未来电网中发挥应有作用。

参考文献 (References)

- [1] Dell R M, Rand D A J. Energy storage—a key technology for global energy sustainability[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 100(1-2): 2-17.
- [2] 程时杰, 李刚, 孙海顺, 等. 储能技术在电气工程领域中的应用与展望[J]. *电网与清洁能源*, 2009, 25(2): 1-8.
Cheng Shijie, Li Gang, Sun Haishun, et al. *Power System and Clean Energy*, 2009, 25(2): 1-8.
- [3] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. *电网技术*, 2008, 32(7): 1-9.
Zhang Wenliang, Qiu Ming, Lai Xiaokang. *Power System Technology*, 2008, 32(7): 1-9.
- [4] Shimada R, Mukai K. Load-leveling and electric energy storage [J]. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2007(2): 33-38.
- [5] Faias S, Sousa J, Castro R. Contribution of energy storage systems for power generation and demand balancing with increasing integration of renewable sources: Application to the Portuguese power system [C]// *Proceedings of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, Sept 2-5, 2007. Institution of Electrical Engineers, European Power Electronics Association, 2007: 1-10.
- [6] Chen H C, Yang T N, Tan W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19: 291-312.
- [7] Ahmed Faheem Zobia. Energy storage—technologies and applications [M]. Croatia: InTech, 2013.
- [8] Ibrahim H I, Perron A. Energy storage systems—Characteristics and comparisons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(5): 1221-1250.
- [9] Kondoh J, Ishii I, Yamaguchi H, et al. Electrical energy storage systems for energy networks [J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(17): 1863-1874.
- [10] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Mei Zuyan. *Pump storage power generation technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [11] McCleer P J, Meisel J. Variable speed operation of pumped storage power plants[J]. *Trends in electric utility research*, 1984: 113-126.
- [12] Yanagisawa H, Kageyama T, Okamura K, et al. Transient analysis of a converter-fed adjustable speed generator-motor for the pumped storage power plant[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 1996, 116(2): 63-76.
- [13] Merino J M, Lopez A. ABB Varspeed generator boosts efficiency and operating flexibility of hydropower plant [J]. *ABB Review*, 1996, 3: 33-38.
- [14] Taguchi T A, Mukai K, Yanagisawa K, et al. Variable speed pumped storage system fed by large-scale cycloconverter [C]// *Proceedings of the 4th European Conference on Power Electronics and Applications*. Institution of Electrical Engineers, European Power Electronics Association, 1991, 2: 237-242.
- [15] Kita E, Bando A, Kuwabara T. 400 MW adjustable-speed pumped storage hydraulic power plant[J]. *Hitachi Review*, 1995, 44(1): 55-62.
- [16] Bocquel A, Janning J. Analysis of a 300MW variable speed drive for pump-storage plant applications[C]. *European Conference on The Power Electronics and Applications*, Dresden, Germany, Sept 12-14, 2005.
- [17] Kuwabara T, Shibuya A, Furuta H, et al. Design and dynamic response characteristics of 400 MW adjustable speed pumped storage unit for

- Ohkawachi power station [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(2): 376-384.
- [18] 张皓, 续明进, 杨梅. 高压大功率交流变频调速技术: 泵与风机的调速运行原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Zhang Hao, Xu Mingjin, Yang Mei. Variable frequency drive for large capacity application[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [19] 韩民晓, 尹忠东, 徐永海, 等. 柔性电力技术——电力电子在电力系统中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Han Minxiao, Yin Zhongdong, Xu Yonghai, et al. Flexible electric technology—Application of power electronics in power system [M]. Beijing: China Waterpower Press, 2007.
- [20] Schwery A, Fass E, Henry J M, et al. Pump storage power plants, [C] ALSTOM's long experience and technological innovation. Hydro 2005, Villach, Austria, Oct 31-Nov 3, 2005.
- [21] MITSUBISHI. Pumped Storage Power Station with Adjustable Speed Pumped Storage Technology [R]. Energy and Resources Institute, 2009 http://www.teriin.org/events/docs/present_japan/ sess4/yokota_part1 -2 -malco.pdf.
- [22] Abdalla O H, Han M X. Variable speed pumped storage based on the use of H-bridge cascaded multilevel converter [C]//Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2012: 402-405.
- [23] 任永峰. 双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Ren Yongfeng. Flexible grid integration and operation for doubly-fed wind generator[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [24] Fabien M. Han Minxiao. Small scale hydro power plants in Rwanda and their optimal exploitation [C]//Proceedings of Conference on China Technological Development of Renewable Energy Source. New York: Scientific Research Publishing, 2010.
- [25] 张晓东. 基于 PWM 有源逆变器的内反馈串级调速系统的仿真研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
Zhang Xiaodong. Simulation research on cascade speed control system of inner-feedback motor controlled by PWM inverter [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2010.
- [26] Suul J, Undeland K. Variable speed pumped storage hydropower for integration of wind energy in isolated grids-case description and control strategies [C]. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, 2008-06-09.
- [27] Suul J. Control of variable speed pumped storage hydro power plant for increased utilization of wind energy in an isolated grid [D]. Norwegian University of Science and Technology, Department of Electrical Power Engineering, 2006.
- [28] Blasko V, Kaura V. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 116-123.
- [29] Suul J A, Uhlen K, Undeland T. Wind power integration in isolated grids enabled by variable speed pumped storage hydropower plant[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008 -11 -24. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008: 399-404.
- [30] Fabien M. Study of Rwandan grid-connected variable speed small scale hydropower plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.

(责任编辑 齐志红)

· 学术动态 ·



2013 年中国科学院院士、 中国工程院院士增选有效候选人名单公布

2013 年中国科学院院士增选候选人推荐工作于 4 月 30 日结束。经过院士推荐和归口初选部门推荐,并经中国科学院学部主席团审议,确认 2013 年中国科学院院士增选有效候选人为 391 人。其中,数学物理学部 68 人,化学部 52 人,生命科学和医学学部 88 人,地学部 75 人,信息技术科学部 50 人,技术科学部 58 人。2013 年计划增选名额不超过 60 名,最终结果将在 2013 年底公布(http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/201305/t20130520_3842029.shtml)。

2013 年中国工程院院士增选候选人提名、遴选工作于 4 月 25 日结束。经形式审查和中国工程院主席团审定,2013 年中国工程院院士增选有效候选人共 560 人。其中,机械与运载工程学部(52 人),信息与电子工程学部(60 人),化工、冶金与材料工程学部(74 人),能源与矿业工程学部(60 人),土木、水利与建筑工程学部(74 人),环境与轻纺工程学部(51 人),农业学部(64 人),医药卫生学部(89 人),工程管理学部(36 人)。2013 年计划增选名额不超过 60 名(<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2013/5/278149.shtml>)。